

***А. А. Калинин\*, П. С. Кусакин***

Белгородский государственный национальный исследовательский университет,  
г. Белгород

*\*lexs4@mail.ru*

Научный руководитель – проф., д-р физ.-мат. наук *А. Н. Беляков*

## ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ДЕФОРМАЦИИ НА МИКРОСТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА TWIP-СТАЛЕЙ

Изучены микроструктура и механические свойства высокомарганцевых аустенитных сталей Fe–17.5Mn–0.3C–1.5Al и Fe–18Mn–0.4C при растяжении в интервале скоростей деформации  $10^{-5}$ – $10^{-1}$  с<sup>-1</sup>. Было установлено, что увеличение скорости деформации от  $10^{-5}$  с<sup>-1</sup> до  $10^{-1}$  с<sup>-1</sup> приводит к увеличению предела текучести и уменьшению предела прочности и относительного удлинения в обеих сталях. В микроструктуре обеих сталей при малых скоростях деформации ( $10^{-5}$  с<sup>-1</sup>) процесс двойникования протекает последовательно с образованием двойников сначала одной системы двойникования, затем других. Дальнейшее увеличение скорости деформации приводит к одновременному образованию двойников различных систем двойникования, разбивающих микроструктуру на отдельные кристаллиты в форме параллелограммов.

*Ключевые слова:* аустенитные высокомарганцевые стали; пластичность, наведенная двойникованием; деформационное упрочнение; скорость деформации; TWIP.

***A.A. Kalinenko, P.S. Kusakin***

## EFFECT OF STRAIN RATE ON THE MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF TWIP-STEELS

The microstructure and mechanical properties of high-manganese austenitic steels Fe–17.5Mn–0.3C–1.5Al and Fe–18Mn–0.4C in the strain rate range of  $10^{-5}$ – $10^{-1}$  s<sup>-1</sup> were studied. It was found that an increase in the strain rate from  $10^{-5}$  s<sup>-1</sup> to  $10^{-1}$  s<sup>-1</sup> leads to an increase in the yield strength and a decrease in the tensile strength and elongation in both steels. The microstructure evolution of both steels at low strain rates ( $10^{-5}$  s<sup>-1</sup>) can be described as sequential formation of twins of different twinning systems. A further increase in the tensile strain rate leads to the simultaneous formation of twins of various twinning systems that separates the microstructure into individual parallelogram-like crystallites.

*Keywords:* austenitic high-manganese steels, twinning induced plasticity, strain hardening, strain rate, TWIP.

Развитие современных сталей с высокой прочностью, хорошей пластичностью, вязкостью и способностью к глубокой вытяжке необходимо для производства современных автомобилей с пониженным весом и повышенной прочностью кузова, а также сложными формами, которые соответствуют последним модным тенденциям в их дизайне. В настоящее время в категории перспективных высокопрочных автомобильных сталей рассматриваются высокомарганцевые аустенитные TWIP-стали (Twinning Induced Plasticity – пластичность, наведённая двойникованием), т. е. основным механизмом её деформации является двойникование. Эти стали имеют высокую пластичность (до 100 %) и удовлетворительный предел текучести [1].

В качестве материала исследования были выбраны две высокомарганцевые стали аустенитного класса следующего химического состава (в вес. %): Fe–17.7Mn–0.328C–1.5Al–0.01Si–0.06Cr–0.006S–0.02P и Fe–17.4Mn–0.44C–0.01Al–0.33Si–0.09Cr–0.003S–0.02P. Данные стали в исходном состоянии были подвергнуты горячей прокатке при температуре 1150 °C и последующему отжигу при температуре 1150 °C в течение часа. Микроструктурные исследования были проведены с помощью просвечивающего электронного микроскопа (ПЭМ) JEOL JEM 2100 при ускоряющем напряжении в 200 кВ. Фольги для ПЭМ были вырезаны из рабочей части образцов для растяжения. Испытания на растяжение пропорциональных плоских образцов в диапазоне скоростей деформации  $10^{-5}$ – $10^{-1}$  с<sup>-1</sup> проводили на универсальной машине Instron 5882 при температуре 20 °C [2].

Испытания на растяжение показывают, что сталь Fe–17.5Mn–0.3C–1.5Al (рис. 1, а) при скорости деформации  $10^{-5}$  с<sup>-1</sup> демонстрирует предел текучести, равный 235 МПа. Значения временного сопротивления и относительного удлинения составляют 750 МПа и ~100 % соответственно. При скорости деформации  $10^{-3}$  с<sup>-1</sup> предел текучести равен 220 МПа. Значение временного сопротивления и относительного удлинения составляют 720 МПа и ~90 % соответственно. При увеличении скорости деформации до  $10^{-1}$  с<sup>-1</sup> значение предела текучести повышается до 250 МПа. Временное сопротивление падает до 630 МПа при относительном удлинении, равном 73 %.

В стали Fe–18Mn–0.4C (рис. 1, б) при скорости деформации, равной  $10^{-5}$  с<sup>-1</sup> предел текучести и временное сопротивление составляют 300 МПа и 1030 МПа, соответственно, при относительном удлинении до разрушения 87 %. Увеличение скорости деформации до  $10^{-3}$  с<sup>-1</sup> приводит к снижению предела текучести и временного сопротивления до 280 МПа и 920 МПа. Относительное удлинение до разрушения также снижается до 75 %. При дальнейшем увеличении скорости деформации до  $10^{-1}$  с<sup>-1</sup> происходит повышение предела текучести и временного сопротивления до 315 МПа и 830 МПа соответственно, с понижением относительного

удлинения до 63 %. Следует отметить, что в данной стали при скоростях деформации  $10^{-5} \text{ с}^{-1}$  и  $10^{-3} \text{ с}^{-1}$  появляются осцилляции на кривых течения.

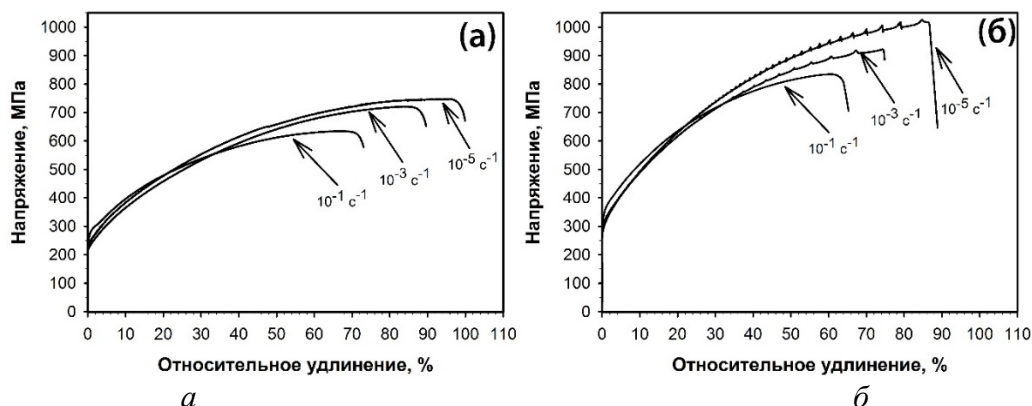


Рис. 1. Кривые течения сталей Fe–17.5Mn–0.3C–1.5Al (а) и Fe–18Mn–0.4C (б) при различных скоростях деформации

Данная сталь демонстрирует более высокие прочностные характеристики при различных скоростях деформации по сравнению со сталью Fe–17.5Mn–0.3C–1.5Al. Предел текучести и временное сопротивление больше на ~50 МПа и ~300 МПа. Однако, относительное удлинение меньше, чем у стали Fe–17.5Mn–0.3C–1.5Al. Основной причиной разницы в величине механических свойств является более высокое содержание углерода в стали Fe–18Mn–0.4C и, соответственно, более высокое твердорастворное упрочнение [3].

На рис. 2 представлена тонкая структура сталей Fe–17.5Mn–0.3C–1.5Al и Fe–18Mn–0.4C после испытаний на растяжение при скорости деформации, равной  $10^{-5} \text{ с}^{-1}$ . При данной скорости деформации в зернах происходит последовательное образование деформационных двойников сначала одной системы двойникования, потом других (рис. 2, а, б). Толщина отдельных двойников составляет 12–25 нм для стали Fe–17.5Mn–0.3C–1.5Al (рис. 2, а) и 30–50 нм для стали Fe–18Mn–0.4C (рис. 2, б).

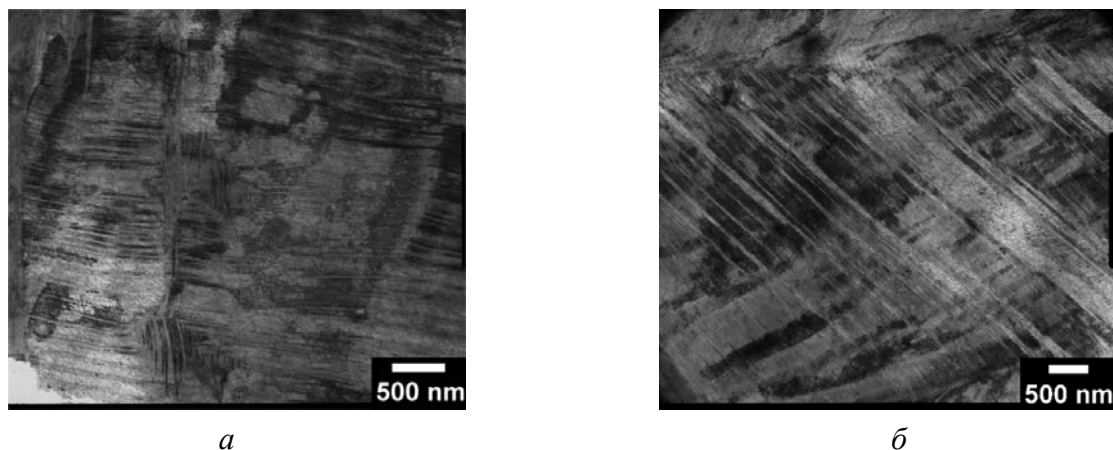


Рис. 2. Микроструктура сталей после испытаний на растяжение при скорости деформации  $10^{-5} \text{ с}^{-1}$ : (а) Fe–17.5Mn–0.3C–1.5Al, (б) Fe–18Mn–0.4C

Дальнейшее увеличение скорости деформации до  $10^{-3} \text{ с}^{-1}$  приводит к активации других систем двойникования (рис. 3, а, б). В сталях Fe–17.5Mn–0.3C–1.5Al и Fe–18Mn–0.4C ширина двойников практически не изменяется и составляет 20–50 нм. Множественное двойникование приводит к разбиению микроструктуры на отдельные кристаллиты в форме параллелограммов.

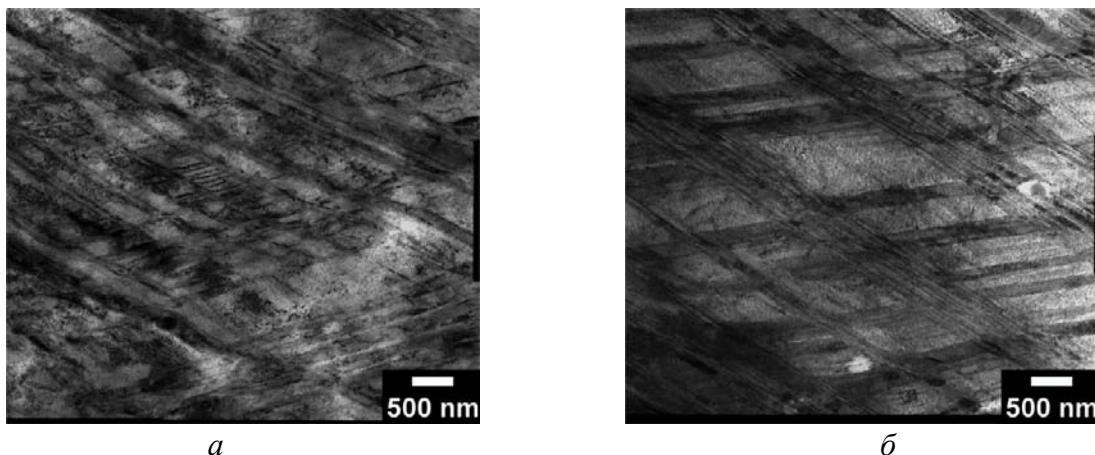


Рис. 3. Микроструктура сталей после испытаний на растяжение при скорости деформации  $10^{-3} \text{ с}^{-1}$ : (а) Fe–17.5Mn–0.3C–1.5Al, (б) Fe–18Mn–0.4C

Максимальная скорость деформации, равная  $10^{-1} \text{ с}^{-1}$ , приводит к практически одновременному образованию двойников различных систем двойникования. Эта тенденция находит отражение в изменении скорости деформационного упрочнения. За счет одновременного образования двойников различных систем двойникования быстрее исчерпывается способность к деформационному двойникованию, что выражается в падении скорости деформационного упрочнения. Множественное деформационное двойникование приводит к разбиению микроструктуры на кристаллиты в форме параллелограммов (рис. 4, а, б).

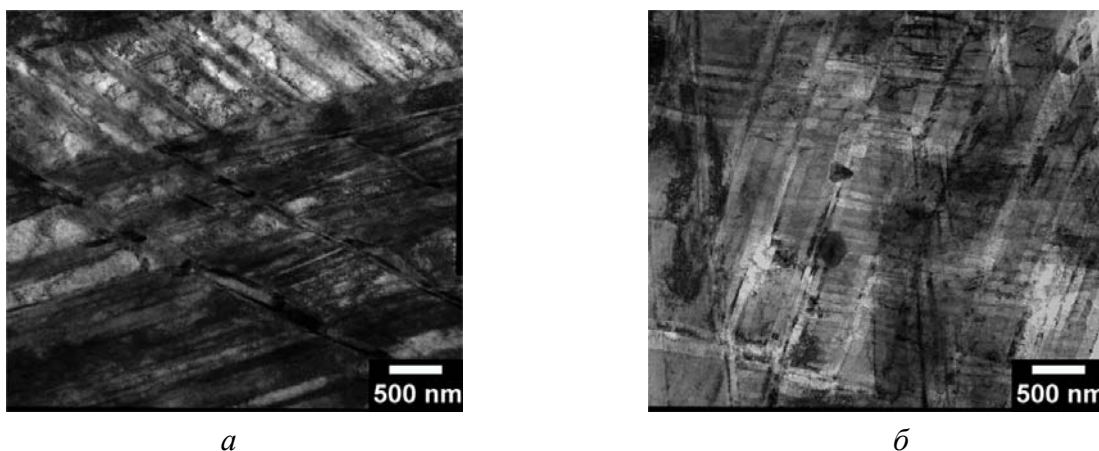


Рис. 4. Микроструктура сталей после испытаний на растяжение при скорости деформации  $10^{-1} \text{ с}^{-1}$ : (а) Fe–17.5Mn–0.3C–1.5Al, (б) Fe–18Mn–0.4C

Таким образом, увеличение скорости деформации приводит к повышению предела текучести и снижению временного сопротивления и относительного удлинения у исследуемых сталей. При малых скоростях деформации ( $10^{-5} \text{ с}^{-1}$ ) в микроструктуре обеих сталей процесс двойникования протекает последовательно с образованием двойников сначала одной системы двойникования, затем других. Дальнейшее увеличение скорости деформации приводит к одновременному образованию двойников различных систем двойникования, приводящие к разбиению микроструктуры на отдельные кристаллиты в форме параллелограммов.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (Соглашение № 14.575.21.0134 Уникальный идентификатор проекта RFMEFI57517X0134).*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. De Cooman B. C. High Mn TWIP Steels for Automotive Applications (Edited by Marcello Chiaberge) / B. C. De Cooman. Vehicle Engineering. 2011. 28 p.
2. ГОСТ 1497–84. Государственный стандарт союза ССР, Металлы. Методы испытаний на растяжение. (ИСО 6892–84, СТ СЭВ 471–88). ИПК издательство стандартов, Москва.
3. On the effect of chemical composition on yield strength of TWIP steels / P. Kusakin [et al.] // Mater. Sci. Eng. A. 2017. V. 687. P. 82–84.